

溶接ボンド部に欠陥を有する継手の J 積分解析

林 健 治*・松 本 幸 次**・堀 川 浩 甫***

J-integral Analysis of Welded Joints with a Crack on Bond

Kenji HAYASHI, Kohji MATUMOTO and Kohsuke HORIKAWA

In welded joints with a crack on the phase boundary such as weld bond, the crack is exposed to tension and shear, which leads to mixed mode cracking. Consequently, the crack extension force both perpendicular and parallel to the plane of the crack acts on the cracked body. In this paper, finite element analyses of the J-integral were performed on welded joints with a crack on and near the weld bond. The effects of the crack situation and the strength ratio of weld metal to base metal on the J-values were confirmed through analytical results. Furthermore, it was proved that the J-integral controlled the stress-strain field in the vicinity of the crack tip of welded joints with a crack on bond.

Key words: welded joint/bond/J-integral/mixed mode

1. 結 言

欠陥を有する溶接継手の不安定破壊に対する抵抗力を表す破壊靱性の評価法として応力支配型の破壊に対しては応力拡大係数 K が用いられ、ひずみ支配型の破壊に対してはき裂開口変位 COD と J 積分が用いられている^{1,2)}。特に、COD は、測定が簡便であり、き裂先端の局所的な変形能に対応していることから、強度的不均一を有する溶接部の靱性評価法として広く使用されている³⁾。

溶接ボンド部のような相境界上に欠陥を有する継手では、き裂開口形状がき裂線に対して非対称となり、き裂をき裂線方向に進展させようとする力と、き裂線直角方向に進展させようとする力が作用する。COD は、本質的に開口モード型の破壊を取り扱うものであり、上述の 2 次元の混合モード型の破壊を COD により評価することは困難である。それゆえ、より合理的な評価法の出現が望まれる。

本研究では、破壊パラメータとして J 積分に重点を

置き、強度不均一さを有する溶接継手のより一般的な混合モード型の破壊に対する抵抗力の評価法を確立することを目差す。また、溶接ボンド部およびその近傍に欠陥を有する溶接継手について有限要素法による J 積分解析を実施し、母材と溶接金属との強度比の影響及び J 積分値のき裂先端近傍における塑性指標性等について検討する。

2. J 積分評価法

非均質材の J 積分評価法として Chen⁴⁾によって開発された手法をより一般的な二次元変形場に拡張する。Fig. 1 に示すき裂を有する物体中に異種材が含まれる場合、 x_k 方向 (x_1 は x 軸、 x_2 は y 軸に対応) にき裂を進展させる力 J_k は次式で与えられる。

$$J_k = J_{kI} - \sum J_{kRi} \quad (k = 1, 2) \quad (1)$$

ここに、

$$J_{kI} = \int \Gamma_k (W \delta_k - \sigma_{ij} u_{i,k}) ds \cdot n_j \quad (2)$$

であり、 W はひずみエネルギー密度、 δ_k はクロネッカーのデルタ、 σ_{ij} は応力テンソル、 u_i は変位であり、 ds 、 n_j はそれぞれ径路上の線素および単位法線ベクトルの成分である。

荷重系および幾何形状がき裂線方向に関して対称であれば、 $J_y = 0$ となり、 J_x のみ算定すればよい。荷重系あるいは幾何形状がき裂線方向に関して非対称の場合

原稿受付：昭和 62 年 3 月 25 日

*長岡技術科学大学建設系

**研究当時長岡技術科学大学大学院 (〒457 名古屋市南区三吉町 4-72-2)

***大阪大学溶接工学研究所 (〒567 大阪府茨木市美穂ヶ丘 11-1)

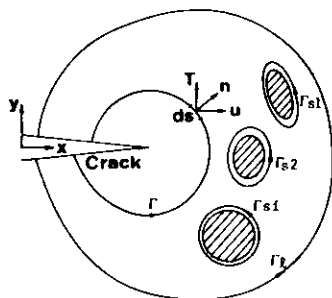


Fig. 1 Definition of J-integral.

には、 J_x と J_y を求め、その合成力 J およびき裂の進展開始方向 θ をそれぞれ以下の式を用いて算定しなければならない。

$$J = (J_x^2 + J_y^2)^{1/2} \quad (3)$$

$$\theta = \tan^{-1} (J_x/J_y) \quad (4)$$

式(1)の物理的意味は次のようにして説明することができる。すなわち、 J_k はき裂を x_k 方向に進展させる力であるので、 $J_k r_i$ はき裂及び異種材を進展させる力を表す。そこで $J_k r_i$ から異種材のみを進展させる力 $J_k r_{si}$ の総和を差し引くことにより、き裂のみを進展させる力 J_k を評価することができる。当然ではあるが、均質材では、 $J_k r_{si}$ は零となり、Eshelbyが定義した線積分⁶⁾と一致する。

線形弾性体および全ひずみ理論に従う弾塑性体について式(1)の J 積分の径路独立性はGaussの積分定理等⁶⁾を用いて誘導することができるが、ここでは、別な角度から概念的な説明を加える。

今、 Γ を互いに交わらない有限個の区分的に滑らかなJordan曲線 $\Gamma_0, \Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_n$ で囲まれた領域とし、各 Γ_i は Γ_0 の内部にあるとする。任意な複素関数(この関数の線積分を J^* とする)が閉曲線内で正則であれば、Cauchyの積分定理より

$$J^* \Gamma_0 = \sum J^* \Gamma_i \quad (5)$$

となる。したがって、上式を利用して式(1)の径路独立性をアナロジーにより説明できる。

3. 溶接ボンド部の靱性評価

3.1 解析方法

ひずみ増分理論に基づく有限要素法により平面ひずみ解析を実施した。Fig. 2に示す様に解析モデルには横ビードを有するCT試験片を用い、ビード幅は8 mmとした。また、 J 積分値に及ぼすき裂の存在位置の影響と、母材に対する溶接金属の降伏応力の比、強度比の影響を調べるために、き裂がビードから4 mm離

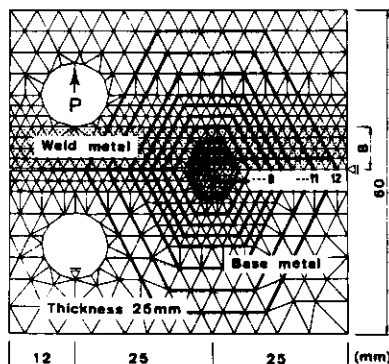


Fig. 2 Finite element mesh.

れた場合、母材や溶接金属のみから成る場合についても併せて解析を実施した。

解析に用いた材料定数は、母材と溶接金属の降伏応力がそれぞれ31.0 kg/mm²、46.5 kg/mm²であり、ひずみ硬化率は共に210 kg/mm²で一定とした。要素数は1088、節点数は613であり、要素の最小寸法は板幅(=50 mm)の1/50とした。積分径路はFig. 2に示す様にき裂とボンド部を囲む12通りの径路とボンド部のみを囲む12通りの径路を採用し、式(1)により J_x と J_y を求め、式(3)より J 積分値を算定した。得られた J 積分値の径路ごとのばらつきをFig. 3に示す。高負荷段階になるとき裂先端近傍で幾分ばらつきが観察されるが、全体としてほぼ径路独立性を満足することが確認された。それゆえ、これらの平均値は妥当な値を与えるものと推察されるので、以後の J 積分値はこれら12

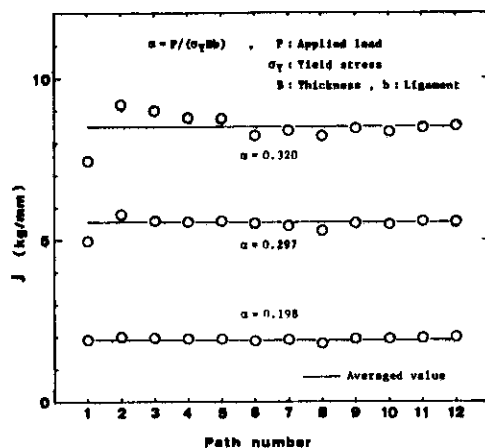


Fig. 3 Path independency of J-integral.

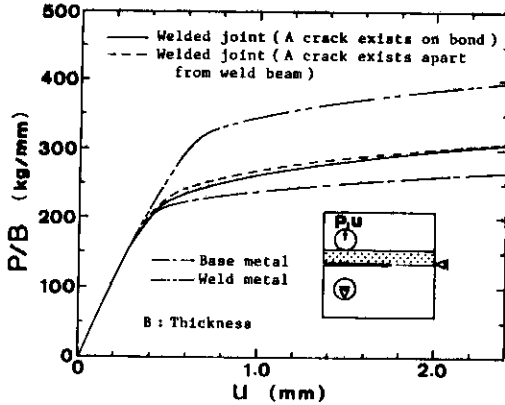


Fig. 4 Load-load point displacement curves.

通りの径路の値を平均した値を用いた。

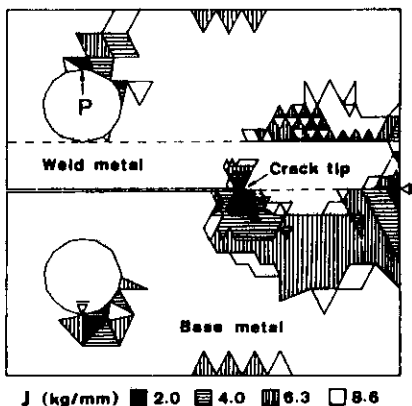
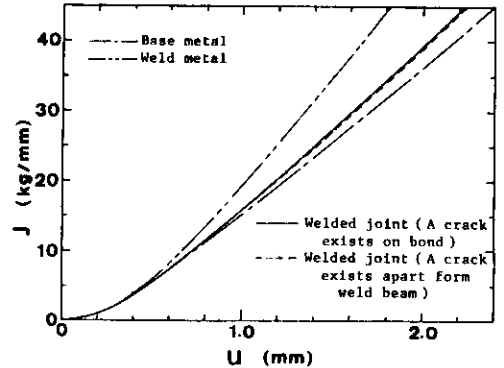
3.2 継手の変形挙動および塑性域の拡がり

Fig. 4 に荷重 P と荷重点変位 u の関係を示す。継手の P - u 曲線は母材と溶接金属の間で、母材側に比較的近く、その関係はき裂の位置にはあまり影響を受けないようである。

Fig. 5 はボンド部にき裂を有する継手の J 積分値の増加に伴う塑性域の拡がりを示す。母材側の塑性域の拡がり顕著であり、非対称な変形挙動を呈する。また、母材側のリガメント部で先に全断面降伏し、その間、溶接金属側では塑性域の拡がりがき裂先端近傍に限定されるので、母材側の変形が卓越し、 P - u 曲線が母材側に近い値を示したものと推察される。

3.3 J 積分と荷重点変位の関係

Fig. 6 に J 積分と荷重点変位 u の関係を示す。ここに、 J 積分値は式(3)の合成力 (J_x と J_y は式(1), (2)より評

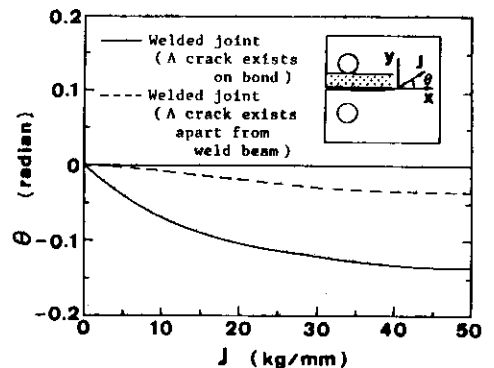

 Fig. 5 Plastic zone development for various J -values.

 Fig. 6 Variation of J -integral with load point displacement.

価した)を用いている。き裂がボンド部にある場合およびボンド部から 4 mm 離れている場合共に母材の J - u 曲線に近い関係を示し、母材との差は計算の範囲内では最大でも 10% 程度である。したがって、本計算の範囲内では、 J 積分値はき裂の位置および材料の強度比にあまり影響を受けない。

なお、本計算の妥当性を検証するために、別途 J 積分の解析を実施した。その結果、式(3)の J 積分値と J 積分が良好に一致することを確認したが、その詳細についてはここでは省略する。

3.4 J 積分とき裂進展開始方向

Fig. 7 に J 積分と、式(4)により算定したき裂の進展


 Fig. 7 Fracture angle versus J -integral.

開始方向 θ の関係を示す。き裂が相境界から離れている場合には、 J が大きい段階でも θ は零に近く、ほぼき裂線方向にき裂が進展するものと考えて差し支えない。一方、ボンド部にき裂が存在する場合には、 θ は J 積分値の増加と共に大きくなり、ほぼ一定値 (約 8°) に近づき、き裂は母材側に進展するものと推察される。

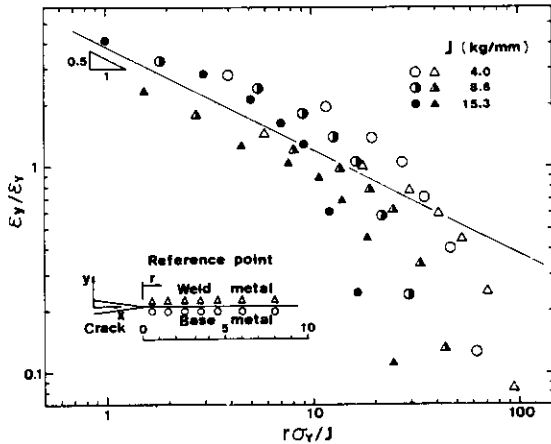


Fig. 8 Normal strain on plane ahead of crack tip versus normalised distance.

2つの解析例から、溶接ボンド部に欠陥を有する継手では、き裂先端付近の母材側に生じる微小き裂が初期の段階では θ なる傾きに進展し、ボンド部から離れるに従いボンドに沿ってほぼ平行に進展するものと予想される。この予想は、文献(8)の結果とほぼ一致し、本研究がき裂の進展径路に関する定量的な情報を提供できる可能性があることを示唆するものと思われる。

3.5 J積分の塑性指標性

J積分がき裂先端近傍の応力ひずみ場を規定する破壊パラメータとなる根拠はHRR解⁹⁾による。縦ビードを有する中央切欠き材では、相境界(ボンド)上で若干不連続性は見られるものの、ほぼHRR解を満足することが明らかにされた⁹⁾。

本解析例についてHRR特異性に関する検討を加えた結果をFig. 8に示す。ボンド上下の溶接金属および母材側ではほぼHRR特異性を満足することが確認された。したがって、溶接継手においても素材の場合と同様にJ積分が破壊を支配するパラメータとなり得る。

4. 結 言

本研究では、溶接ボンド部に欠陥を有する継手の破壊抵抗を評価する手法を確立することを目的として、

有限要素法によりJ積分解析を実施し、継手の変形挙動、J積分値に及ぼすき裂の位置と材料の強度比およびJ積分値の塑性指標性等を検討した。その結果を要約すると以下の通りである。

- (1) 本研究で示したJ積分評価法は、溶接ボンド部のような相境界上あるいはその近傍に欠陥を有する継手の混合モード型の破壊に対する抵抗力の推定法として適用することができるものと思われる。
- (2) J積分値はき裂の存在位置および母材と溶接金属の強度比の影響を受けることが確認された。
- (3) 本研究の範囲内では、J積分は欠陥を有する溶接継手のき裂先端近傍の応力ひずみ場を規定する破壊パラメータとなることが確認された。しかしながら、母材と溶接金属の加工硬化指数が大きく異なる場合には、HRR解が成立しなくなる可能性も考えられるので、今後の課題としたい。

以上、解析データは非常に少ないがここで示したJ積分評価法は、強度不均一場中に欠陥を有する継手の破壊靱性を推定する上で、有力な手法となり得る可能性があるものと思われるので、種々の溶接継手に本法を適用し、その変形能力と破壊靱性との関係を今後共に検討する予定である。

参 考 文 献

- 1) 佐藤, 豊田, 伊藤, 川口, 有持, 鈴木, 多々良, 日本造船学会論文集, No. 142 (1977), pp. 148-155.
- 2) 藤本, 中込, 泉, 日本建築学会論文集, No. 328 (1983), pp. 71-82.
- 3) 佐藤, 豊田, 南, 有持, 中西, 佐藤, 溶接学会論文集, 2-3 (1984), pp. 87-94.
- 4) W. H. Chen, Trans. 5th Int. Conf. SMIRT, M9/4 (1979), pp. 1-8.
- 5) J. D. Eshelby, Inelastic Behavior of Solids, McGraw-Hill (1970), pp. 77-115.
- 6) 林, 松本, 堀川, 材料, Vol. 36 (1987), pp. 341-347.
- 7) 青木, 岸本, 鍋田, 坂田, 材料, Vol. 31 (1981), pp. 370-375.
- 8) 有持, 中西, 佐藤, 南, 豊田, 佐藤, 溶接学会論文集, Vol. 1 (1983), pp. 232-239.
- 9) J. W. Hutchinson, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 16 (1968), pp. 13-31.